

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-292164
(43)Date of publication of application : 05.11.1996

(51)Int.CI. G01N 23/04

(21)Application number : 07-099202
(22)Date of filing : 25.04.1995

(71)Applicant : HITACHI LTD
(72)Inventor : TOKIDA RURIKO
KAKIBAYASHI HIROSHI
NAKAMURA KUNIYASU
SEKIHARA KENSUKE
MOTOIKE JUN

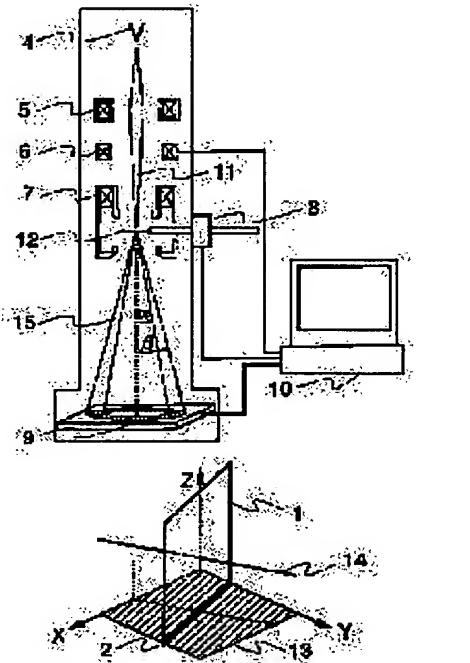
(54) ELECTRON MICROSCOPE AND THREE-DIMENSIONAL ATOMIC ARRANGEMENT OBSERVING METHOD

(57)Abstract:

PURPOSE: To accurately reconstitute a three-dimensional atomic arrangement structure in which artifacts are eliminated or reduced by specifying the direction of the oblique axis of a sample from a plurality of two-dimensional projection images and reconstituting a three-dimensional structure.

CONSTITUTION: An electron beam 11 is incident to the positions of the sample 12 of an integrated element reduced in thickness. Scattering angle ranges α to β are so set to the high angle side of several tens mrad or more for mostly occupying thermal diffuse reflection electron beam that the image contrast corresponds to the quantity of scattered electron beam 15, the sample 12 is inclined 8 around an oblique axis and the quantity of the beam 15 is measured to obtain a plurality of two-dimensional projection images 13 observed from various directions.

The axis 14 is specified by the image analysis of the plurality of the images 13, set as designing specifications, a two-dimensional sectional image 1 perpendicular to the images 13 is constructed from the plurality of the images 13, and the three-dimensional atomic arrangement image constituted by stacking them is analyzed. Thus, the impurity atom in the sample 12 crystal and the three-dimensional structure of its cluster can be analyzed at the level of one atom.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 15.03.2000

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

3304681

[Date of registration]

10.05.2002

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-292164

(43)公開日 平成8年(1996)11月5日

(51)Int.Cl.⁶
G 0 1 N 23/04

識別記号 庁内整理番号

F I
G 0 1 N 23/04

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数11 O.L (全 9 頁)

(21)出願番号 特願平7-99202
(22)出願日 平成7年(1995)4月25日

(71)出願人 000005108
株式会社日立製作所
東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地
常田 るり子
(72)発明者 東京都国分寺市東恋ヶ窪1丁目280番地
株式会社日立製作所中央研究所内
柿林 博司
(72)発明者 東京都国分寺市東恋ヶ窪1丁目280番地
株式会社日立製作所中央研究所内
中村 邦康
(72)発明者 東京都国分寺市東恋ヶ窪1丁目280番地
株式会社日立製作所中央研究所内
(74)代理人 弁理士 小川 勝男

最終頁に続く

(54)【発明の名称】電子顕微鏡及び3次元原子配列観察方法

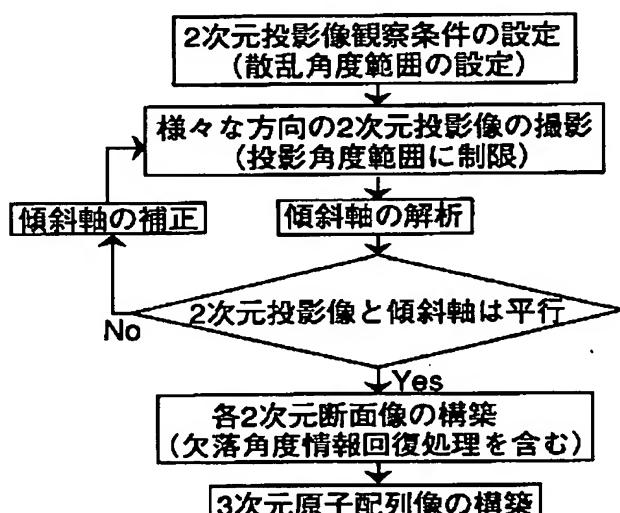
(57)【要約】

【目的】2次元の電子顕微鏡像から試料の3次元原子配列像を高精度に構築するために必要な2次元像観察法及び3次元画像再構成法を提供する。

【構成】TEM像コントラストが試料の厚さ及び原子番号が像コントラストと対応するように数十mrad以上の高角散乱電子線で結像する。また試料を傾斜させた時の試料内の特徴点の位置変化を解析することによって傾斜軸を特定する。解析領域の周りの結晶が解析結果に悪影響を及ぼさないように、解析に不必要的領域を削除する。

【効果】ULSI素子等の実試料中の不純物原子及びそれらのクラスタの3次元的な構造を原子1個のレベルで解析し、リーク電流や耐圧不良などULSI素子の不良解析に有効な情報を提供する。

図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】薄膜化した試料の 2 次元投影像を透過電子顕微鏡で観察する工程、前記観察を試料を傾斜しながら複数回繰り返す工程、前記工程で観察した複数の 2 次元投影像を画像処理して試料の 3 次元構造を再構成する工程から成る試料構造の 3 次元観察法において、前記 3 次元構造を再構成する工程は複数の 2 次元投影像から試料の傾斜軸の方向を特定する工程を含むことを特徴とする 3 次元原子配列観察方法。

【請求項 2】請求項 1 記載の傾斜軸の方向を特定する工程は、試料を傾斜軸周りに数種類の角度で傾斜させた時の 2 次元投影像上に映る試料内の複数の特徴点の位置変化に注目し、ある特徴点の位置を原点として像上の傾斜軸の位置を固定し、他の特徴点が 3 次元空間に描く多角形と該多角形が 2 次元投影像上に映る形状の関係から試料傾斜軸の方向を解析する工程を含むことを特徴とする 3 次元原子配列観察方法。

【請求項 3】請求項 2 記載の試料内の特徴点は、該特徴点に好適な構造が試料内に存在しない場合には、荷電粒子線例えば原子 1、2 個以下の太さに収束させた電子線を注目構造以外の領域に照射することにより試料内に作製された特徴点、例えば欠陥、コンタミネーション跡であることを特徴とする 3 次元原子配列観察方法。

【請求項 4】薄膜化した試料の 2 次元投影像を透過電子顕微鏡で観察する工程、前記観察を試料を傾斜しながら複数回繰り返す工程、前記工程で観察した複数の 2 次元投影像を画像処理して試料の 3 次元構造を再構成する工程から成る試料構造の 3 次元観察法において、前記 3 次元構造を再構成する工程は試料内に注目構造を設定し、該注目構造以外の構造が混入している領域を各 2 次元投影像から削除する工程を含むことを特徴とする 3 次元原子配列観察方法。

【請求項 5】請求項 4 記載の注目構造は、電子線入射方向の試料厚さに対する、試料傾斜軸と直交する面内における注目構造の幅が充分大きいことを特徴とする 3 次元原子配列観察方法。

【請求項 6】請求項 4 記載の注目構造以外の構造が混入している領域は、試料傾斜角度、試料厚さ、注目構造の幅、試料傾斜軸の位置及び方向から幾何学的に決定することを特徴とする 3 次元原子配列観察方法。

【請求項 7】薄膜化した試料の 2 次元投影像を透過電子顕微鏡で観察する工程、前記観察を試料を傾斜しながら複数回繰り返す工程、前記工程で観察した複数の 2 次元投影像を画像処理して試料の 3 次元構造を再構成する工程から成る試料構造の 3 次元観察法において、前記 3 次元構造を再構成する工程は、2 次元投影像を逆投影した段階の 3 次元再構成像から全傾斜角度における 2 次元投影像に含まれていた構造のみを残し、他の構造は削除する工程を含むことを特徴とする 3 次元原子配列観察方法。

【請求項 8】請求項 7 記載の全傾斜角度における 2 次元投影像に含まれていた構造は、試料傾斜角度、試料厚さ及び注目構造の幅から幾何学的に決定することを特徴とする 3 次元原子配列観察方法。

【請求項 9】薄膜化した試料の 2 次元投影像を透過電子顕微鏡で観察する工程、前記観察を試料を傾斜しながら複数回繰り返す工程、前記工程で観察した複数の 2 次元投影像を画像処理して試料の 3 次元構造を再構成する工程から成る試料構造の 3 次元観察法において、2 次元投影像の結像に試料で数度以上の角度で散乱された散乱電子を用いることを特徴とする 3 次元原子配列観察方法。

【請求項 10】請求項 9 記載の数度以上の角度で散乱された散乱電子は干渉成分に対する非干渉成分の比率が大きくなる高角散乱電子線であり、該電子線で結像した 2 次元投影像上の像コントラストは電子線が通過した経路上に存在した原子数及びその原子番号に依存することを特徴とする 3 次元原子配列観察方法。

【請求項 11】電子線を放射する電子線源と、該電子線を試料に照射する第 1 の電子光学系と、該試料を保持する試料ホルダと、該試料ホルダを該照射電子線に対して傾斜する試料傾斜装置と、該試料から出射される電子線で投影像を結像する第 2 の電子光学系と、該投影像を検出する電子線検出装置と、該電子線検出装置の投影像のデータを処理するデータ処理装置からなり、上記試料傾斜装置は試料ホルダの傾斜の中心軸位置を調整する傾斜軸調整装置を有し、上記データ処理装置は上記投影像のデータに基づいて該傾斜軸調整装置を制御することを特徴とする電子顕微鏡。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、メモリ素子、高速演算素子などの集積化素子における不良原因である点欠陥、不純物原子およびそれらのクラスタを原子 1 個のレベルで 3 次元的に観察することに好適な 3 次元原子配列観察方法とこの方法による画像処理手段を有する電子顕微鏡に関する。

【0002】

【従来の技術】電子顕微鏡を用いて結晶中の点欠陥、不純物原子およびそれらのクラスタを原子 1 個のレベルで 3 次元的に観察する方法としては、特開平 4-337236 号公報記載の 3 次元原子配列観察装置及び方法がある。該公報には、試料により或る角度範囲内に散乱された電子線で結像された当該試料の原子種に依存したコントラストを有する 2 次元像（電子顕微鏡像）での当該試料の観察を、試料を傾斜させて当該試料中の同一構造を種々の方向から行ない、これにより得られた観察方向の異なる複数の 2 次元像間での同一原子の位置ずれ量を観察方向に基づいて画像処理することにより 3 次元座標を特定し、3 次元的な原子配列像を構築する技術が開示されている。また、この公報には結像に用いた電子線の散

乱角度範囲と像コントラストの関係の解析から原子種も識別することも開示されている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】上記従来技術の発明には、3次元原子配列観察に適した電子顕微鏡装置の構成、2次元像の観察方法、及び種々の方向から観察した複数の2次元像に基づいて3次元座標を特定して3次元像を再構成することは記載されているが、3次元像の再構成を実現させるための具体的な手段は記載されていなかった。そこで発明者は、これまで主にX線-C T(コンピュータ断層撮影)技術等に用いられてきた画像再構成法(例えば、フィルタ補正逆投影法)を電子顕微鏡像に基づく3次元像の再構成法に適用することを検討した。X線-C T技術において従来の画像再構成法は、全方向から試料にX線を照射して得られた複数の2次元的な投影像に基づき、当該試料の3次元的な内部構造を完全に再構成できる手法であることが数学的にも実験的にも証明されている。

【0004】しかし、この方法を電子顕微鏡像に適応するためには幾つかの条件を満たさなければならない。

【0005】まず第1に、電子線が通過した試料厚さと2次元投影像上の像コントラストの関係が線形でなければならない。具体的には試料の厚さが2倍になれば投影データの値も2倍に、また同じ厚さならば観察方向を変えても投影データの値は同じになるという線形関係の成立が必要である。しかし、結晶内を通過する電子線はX線に比べて複雑な散乱過程をたどるため、この線形関係は一般には保証されない。そのため電子顕微鏡を用いる3次元原子配列観察において、この線形関係から外れた投影データ(即ち、2次元像)の存在は、再構成される3次元像上にアーティファクトを発生させる。

【0006】第2に、電子顕微鏡の筐体内にて、試料の電子線の光軸に対する傾斜角度を所定の値に正確に設定する必要がある。試料の傾斜角度が所望の角度(又は設定すべき角度)より僅かでもずれると、再構成像にアーティファクトが発生するからである。しかし電子顕微鏡においては、試料ホルダの加工精度及び動作精度などの理由により、試料の傾斜軸を設計仕様通りに、即ち試料ホルダのハードウェアのみで設定することは非常に困難であり、試料の傾斜角度と試料ホルダの機械的な動きとを正確に対応させることは事実上不可能である。そこで試料の傾斜角度を正確に設定するには、投影像から傾斜軸を解析し、補正しなければならない。

【0007】第3に、各方向からの観察で得られる投影像が、同一の物体に基づく情報である必要がある。即ち、通常のX線-C T技術では試料におけるX線ビームの照射領域全体が観察対象領域であるため、各方向からX線ビームの照射で得られた投影像は全て同一の物体の情報に基づくものとなる。これに対し電子顕微鏡による3次元原子配列観察では、例えば半導体ウエハやデバイ

ス等の試料中に局在する結晶欠陥や不純物が観察対象領域となる。しかし電子ビームの照射は、試料において当該観察対象領域を取り囲む非観察対象領域(以下、周辺領域)をも含めて行なわれる。周辺領域においても、観察対象領域と同様に照射される電子ビームは散乱されるため、試料中に局在する観察対象領域に各方向から電子ビームを照射して得られた投影像には、電子ビームの照射方向(又は電子ビームに対する試料の傾斜角度)に応じて異なる周辺領域の情報が含まれる。従って、複数の投影像に基づいて構築される3次元像には、投影像毎の周辺領域の情報量のバラツキに起因したアーティファクトが発生する。

【0008】従来の画像再構成法のソフトウェアは通常のX線-C T技術での利用を前提としているため、上述の電子顕微鏡による3次元原子配列観察にて生じるアーティファクトを解消するための配慮はされていなかった。

【0009】本発明の目的は、上記3次元画像再構成の際の障害となるアーティファクトを解消または低減することによって、3次元原子配列構造の再構成を高精度で行う方法とこの方法に基づき3次元画像再構成の処理をする手段を備えた電子顕微鏡を提供することである。

【0010】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するため、本発明では電子顕微鏡による試料の観察において、電子顕微鏡像(二次元投影像)を結像するための電子線の検出と、二次元投影像の画像処理とを以下の要領で行う。

【0011】まず第1として像コントラストの線形性を維持するために、試料への電子線照射時に試料で散乱される電子のうち、像コントラストと試料厚さがほぼ線形な関係になり且つ像コントラストが原子番号に依存するような角度範囲に散乱される電子で二次元投影像を結像する。具体的には、散乱電子の強度において熱散漫散乱による電子の強度が弹性散乱による電子の強度より支配的になる散乱角度範囲において電子(所謂、高角散乱された電子)を検出して二次元投影像を結像する。このために、電子顕微鏡の筐体内部において電子線検出器を、電子光学系の光軸を基準に試料(試料ホルダ)からの高角散乱電子の検出に適した位置に設けるとよい。また、電子検出面における検出領域を任意に設定できる電子線検出器(例えば、ニュービコンやハーピコン)を用いる場合は、検出領域を高角散乱電子の検出に適した検出角度範囲に合わせて設定する。

【0012】第2として試料の照射電子線に対する傾斜角度を正確に設定するために、傾斜軸の解析については、試料を試料ホルダにより回転させ、試料ホルダ自体の傾斜軸(機械的な傾斜軸)周りに数種類の角度で傾斜させて、試料中に存在する少なくとも2個の異物(例えば、試料の主成分となる元素と異なる元素の原子もしく

は原子クラスタ) 又は結晶欠陥等の特徴点の位置変化に注目し、これらの特徴点の2次元投影像における位置をマークする。次にマークした特徴点の一つを特定してその位置を原点とし、機械的な傾斜軸に基づき試料の傾斜角度を順次変化させ、傾斜角度に対して予想される特定の特徴点と他の特徴点との位置関係と実際に観察された位置関係とのずれに基づき、試料の実効的な傾斜軸(即ち、照射電子線に対する実際の試料傾斜の中心となる傾斜軸)を解析する。例えば、特定された特徴点と他の特徴点とで形状が既知の図形を3次元空間に仮想し、特徴点の抽出に用いた複数の(異なる傾斜角度における)投影像における該図形の変形の程度から傾斜軸を解析する。

【0013】理解を容易にするために具体例によって説明すると、まず上述の特徴点間の位置関係を表現するための2つの直交座標系、一つは電子顕微鏡の機械的な構成に基づくもの(以下、観測系)、もう一つは上述の実効的な傾斜軸に基づくもの(以下、試料系)を設定する。観測系の座標軸の一つを電子顕微鏡の電子光学系の光軸又はこれに平行に設定し、試料系の座標軸の一つを上述の実効的な傾斜軸又はこれに平行に設定する。2つの座標系の原点は、上述の特定の特徴点に設定するとよい。ここで試料ホルダを土 α の角度で夫々回転すると、これに対応して特定の特徴点以外の特徴点が試料系の実効的な傾斜軸に平行な座標軸を中心に土 α の角度で移動する。この時、当該特徴点の位置変化の軌跡は試料系の実効的な傾斜軸に垂直な平面において角度 $\alpha/2$ なる2つの角を有する二等辺三角形を描くが、電子顕微鏡像(即ち観測系の電子光学系の光軸に垂直な平面)においては、電子光学系の光軸と実効的な傾斜軸が平行でない限り当該特徴点による同様な位置変化の軌跡は現われない。従って、試料系の平面に仮想される軌跡の形状と、観測系の平面で実測される軌跡の形状とを対応させることにより、機械的な傾斜軸(電子光学系の光軸と一定の位置関係にある)と実効的な傾斜軸とのずれを求める。

【0014】第3として周辺領域の混入に関しては、試料傾斜角度によって投影像に含まれたり含まれなかったりする領域は投影データの両端であり、この領域は投影データを逆投影をした段階の再構成像において周辺部のみに存在する事を利用する。投影データ及び再構成像からこの領域を削除し、同一構造の再構成像となる領域のみに欠落角度情報回復処理を行い、断面構造を復元する。

【0015】

【作用】まず第1に投影像を結像する電子として被観察試料により高角散乱された電子、即ち散乱電子の強度において電子光学系や試料厚さの条件による干渉を受ける弾性散乱電子よりもこれらの条件に対し非干渉な熱散漫散乱電子が支配的となる角度に散乱される電子を用いることにより、像コントラストに対するこれらの条件の影

響を排除できる。即ち、像コントラストと試料厚さが線形関係に近似できるこのような角度範囲の散乱電子を用れば、結晶を通過した電子線で結像した2次元像にも一般的な画像再構成の理論が適応可能となり、再構成した3次元構造における異原子の位置及びコントラストを定量的に解析できる。

【0016】第2に試料に存在する複数の特異な部分をマークして試料の傾斜角度に対するこれらの部分の電子顕微鏡像における位置変化から試料の実際の傾斜を解析する傾斜軸解析法を用いれば、電子顕微鏡において設定された試料ホルダの傾斜角度と試料の照射電子線に対する実際の傾斜角度とを対応させることができる。即ち、電子顕微鏡のハードウエアだけでは試料ホルダやその傾斜装置の機械的な精度の限界から正確に把握できなかつた3次元的に任意の方向に向いている試料の照射電子線に対する実効的な傾斜軸を電子顕微鏡像(画像)ベースに解析できる。従って、特に原子レベルでの3次元像観察に必須の微細な試料の傾斜角度設定を略確実に行なうことが可能となる。

【0017】第3に不要領域、即ち所望の観察領域を取り囲む周辺領域の情報を投影像から除去すれば、解析したい所望の領域の周りに3次元画像再構成処理の障害となる構造が含まれていても、注目する構造を3次元再構成することができる。

【0018】以上の3つの方法は、電子顕微鏡のハードウエアの制御装置や画像処理装置において制御又は処理シーケンスに組み込むこともできる。例えば、電子線を放射する電子線源と、電子線を試料に照射する第1の電子光学系と、試料を保持する試料ホルダと、試料ホルダを照射電子線に対して傾斜する試料傾斜装置と、試料から出射される電子線で投影像を結像する第2の電子光学系と、投影像を検出する電子線検出装置と、電子線検出装置の投影像のデータを処理するデータ処理装置からなる電子顕微鏡において、上述の第1の散乱電子線検出条件の設定を、第1の光学系による試料への中空状電子線

(ホローコーンビーム) 照射や2次元的な電子線検出面を有する電子線検出装置での当該検出面における電子線検出領域設定の制御により行なえる。上述の第2の傾斜軸解析法は、試料傾斜装置により設定された試料傾斜角ごとの投影像をデータ処理装置で処理し、試料傾斜装置の機械的な傾斜軸と投影像から得られた実効的な傾斜軸とのずれを算出したデータに基づきデータ処理装置から試料傾斜装置に制御信号を送る(フィードバックをかける)。試料傾斜装置が試料ホルダの傾斜の中心軸位置を調整する傾斜軸調整装置を有する場合は、データ処理装置により傾斜軸調製装置を制御するとよい。また上述の第3の画像処理方法は、データ処理装置に画像処理ソフトとして搭載するとよい。

【0019】

【実施例】画像再構成は、直観的には図1に示す様にあ

る物体の2次元断面像1の様々な方向について投影データ2を記録し、該投影データを逆投影して2次元再構成像3を再構成する処理である。2次元再構成像3と2次元断面像1が一致すれば、元の像を完全に復元できることになる。本発明では、前記画像再構成法を実際に観察された電子顕微鏡像に適応するために必要な観察条件及び処理を明確化し、更に該条件を満たす方法を提供する。

【0020】図2は本発明の実施例で用いた電子顕微鏡の基本構成である。電界放出型電子銃4、コンデンサーレンズ5、ビーム偏向走査コイル6、対物レンズ7、試料微動・傾斜機構8、電子線検出器9、制御用及び画像処理用プロセッサ10から構成されている。図3は3次元原子配列像を構築する工程を示すフローチャートである。2次元投影像13の観察条件を設定する工程、薄膜化した試料12をある傾斜軸14周りに傾斜させて種々の方向から観察した複数の2次元投影像13を得る工程、該複数の2次元像13から前記傾斜軸14を画像解析によって特定する工程、該傾斜軸14を設計仕様通りに設定する工程、前記複数の2次元投影像13から投影像と直交する各2次元断面像1を構築する工程、該2次元断面像1を積み重ねて構築した3次元像から3次元原子配列像を解析する工程から成る。以下に、各工程の詳細を説明する。

【0021】まず、前記2次元投影像13を得る工程を示す。原子1～2個以下の太さの電子線11で薄膜化した試料12を走査し、試料内の原子によって散乱された電子のうち、ある散乱角度範囲 $\alpha \sim \beta$ の散乱電子線15の強度を検出し、該強度を前記電子線の走査と同期させてCRT上に輝度変調表示し、2次元投影像13を観察する。前記検出角度範囲は下記の幾つかの条件を満たす様に設定する。まず、該検出角度範囲を設定するためには、試料内の電子線の散乱過程を考察する。試料12を通過する電子線は、試料12内の原子によって散乱される。散乱電子線量と散乱角度は一般に図4に示す様な関係にある。ある散乱角にピークを持ち、高散乱角側へ裾広がりを持つ分布を持っており、この分布は電子を散乱する原子の原子番号Zが大きいほど高散乱角側へシフトしていく。従って、図4に示す散乱角度範囲 $\alpha \sim \beta$ の電子線量は原子番号Zの大きい試料の方が大きくなる。ここで、図5に示す様にSi(シリコン)結晶中にAg(銀)粒子が存在する試料12に電子線11を各位置に入射し、散乱角度範囲 $\alpha \sim \beta$ の電子線15の量を測定した場合を考える。位置(1)に電子線11が入射した場合、電子線はSi結晶しか通過しないので散乱角度範囲 $\alpha \sim \beta$ の電子線15の量は少ない。位置(2)に電子線

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \phi \cos \theta & -\sin \psi \sin \phi & \cos \psi \sin \phi \cos \theta + \sin \psi \cos \phi & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \psi \cos \phi \cos \theta & -\cos \psi \sin \phi & -\sin \psi \sin \phi \cos \theta + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta & \sin \psi \sin \theta & \sin \psi \cos \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \dots \text{数1}$$

11が入射した場合、電子線はSi結晶の他に原子番号の大きいAg原子を通過するので散乱角度範囲 $\alpha \sim \beta$ の電子線15の量は多くなる。位置(3)に電子線11が入射した場合、電子線は2個のAg原子を通過するのでその分散乱角度範囲 $\alpha \sim \beta$ の電子線15の量は多くなる。また位置(4)に電子線11が入射した場合、Si原子が1個欠落しているので位置(1)よりも散乱角度範囲 $\alpha \sim \beta$ の電子線15の量は少なくなる。以上の様に、散乱角度範囲 $\alpha \sim \beta$ の電子線15の量は、電子線を散乱させた原子数とその原子番号Zに対応している。

【0022】次に、電子線15の量と該電子線で結像した2次元像の像コントラストの対応について考察する。試料によって散乱された電子は、可干渉な弾性散乱電子と非干渉な熱散漫散乱電子に分けられる。弾性散乱電子線は僅かな位相の変化、すなわち対物レンズ7のデフォーカスや試料12の厚さの変化に伴い電子線強度の振動が起こるため像コントラストが散乱電子線量と対応するとは限らない。一方、熱散漫散乱電子線は非干渉であるために前記振動は起こらず、像コントラストと散乱電子線量は対応する。散乱電子線における弾性散乱と熱散漫散乱の占める割合と散乱角度の関係は一般に図6に示す関係になる。弾性散乱電子量は低散乱角位置にピークを持ち散乱角度が増加すると急激に減少する。一方、熱散漫散乱電子量は散乱角度依存性が少ない。そのため高角側では熱散漫拡散電子がその大部分を占めるようになる。従って、散乱電子線の検出角度範囲 $\alpha \sim \beta$ を熱散漫散乱電子線がその大部分を占めるくらいの高角側すなわち数十mrad以上に設定すれば、散乱電子線量に対応した像コントラストを得ることができる。例えばSi単結晶に[110]方向から電子線を入射した場合、散乱角度範囲を約50mrad以上に設定すれば、散乱電子線15の量と像コントラストはほぼ線形の関係になることが確認されている。

【0023】上記条件を満たす様に検出角度範囲を設定し、試料傾斜機構8を用いて試料12をある傾斜軸14回りに回転させ、種々の方向から観察した複数の2次元投影像13を得る。

【0024】次に、該複数の2次元投影像13から前記傾斜軸14を画像解析によって特定する工程を示す。まず、図7に示す座標系を仮定する。観測系に固定した直交座標系を座標系xyzとし、試料12に固定した直交座標系を座標系 $\xi\eta\zeta$ とする。座標系xyzと座標系 $\xi\eta\zeta$ との座標変換はオイラー角 $\theta\varphi\phi$ を用いて、以下の式で表される。

【0025】

【数1】

【0026】ここで形状が既知の標準試料があれば、試料系で設定される $(\xi \eta \zeta)$ の値と試料を傾斜軸周りに傾斜させたときに観察系で測定される $(x y z)$ の値の対応からオイラー角 $\theta \psi \phi$ を求めることができる。しかしTEM試料中には形状が既知である様な構造は、一般には含まれていない。そこで試料12内の任意の特徴点、例えばSi結晶中のAg原子を用いる。試料内から2つの特徴点を選択し、その2点を結ぶベクトルを用いて解析する。図8に示す様に、傾斜軸14を ζ 軸とし、試料12を ζ 軸周りに回転させる。試料12を回転させないときのベクトル u 、 ζ 軸周りに $+ \alpha$ 回転させたときのベクトル v 、 $- \alpha$ 回転させたときのベクトル w を仮定する。座標系 $\xi \eta \zeta$ で考えると、ベクトル u 、 v 、 w は $\xi \eta$ 平面上に二等辺三角形を形作っている。ベクトル $s = v - w$ は ζ 軸と平行であり、ベクトル $t = u - (v + w) / 2$ は η 軸と平行である。両者の長さの比は回転角 α から求めることができるので、座標系 $\xi \eta \zeta$ の単位ベクトル、ベクトル $s' = (k, 0, 0)$ 、ベクトル $t' = (0, k, 0)$ を設定できる。観測系 $x y z$ でベクトル u 、 v 、 w の座標を測定して求めたベクトル s' 、 t' の値と、 $\xi \eta \zeta$ 座標系におけるベクトル s' 、 t' の値の対応からオイラー角 $\theta \psi \phi$ 及び単位ベクトルの長さ k を求める事ができ、傾斜軸14である ζ 軸の方向を解析できる。尚、観測系では z 方向から投影像を観察するため z 座標は測定出来ないが、ベクトル s' における x 、 y 座標、ベクトル t' における x 、 y 座標で連立方程式が4つ定義できるので、4つの変数を特定することは可能である。

【0027】上記工程により、形状が既知の試料を用いなくても、試料内の特徴点を用いて傾斜軸14を画像解析によって解析することができる。尚、読み取り誤差等を避けるため、試料内の2点はベクトル s 、 t の長さが出来るだけ大きくなる様に選択する。また、ベクトル s 、 t の長さにあまり差がないようにするために、回転角 δ は出来るだけ大きく取る方が望ましい。また特徴点としては、どの方向から観察してもその位置を特定できる形状、例えば微粒子、直方体の頂点などが望ましい。適当な特徴点が試料内に存在しない場合は、収束した電子線を注目領域の四角に照射して特徴点例えれば欠陥又はコンタミネーション跡を作製する。

【0028】次に、前記傾斜軸14を設計仕様通りに設定する工程を示す。まず、傾斜軸の設計仕様を図9に示す。 z 方向から2次元投影像13を観察した場合、傾斜軸14が投影像面である $x y$ 平面と平行であれば、2次元投影像13上に写る傾斜軸14と直交するラインプロファイルは、2次元断面像1の1次元の投影データ2となる。試料傾斜機構8を用いて傾斜軸14が $x y$ 平面と平行になるように設定し、前記傾斜軸解析法を用いて傾斜軸の方向が前記設計仕様を満たしているかを確認する。仕様を満たしていない場合は試料傾斜機構を用いて

傾斜軸の方向を補正する。

【0029】次に、各2次元断面像を構築する工程を示す。該工程は、前記設計仕様方向に設定された傾斜軸14回りに傾斜させて観察された複数の2次元投影像13から該投影像と直交する2次元断面像の1次元投影データを収集する工程、該1次元投影データを逆投影して2次元再構成像を構築する工程、該2次元再構成像から2次元断面像の復元が不可能な領域を削除する工程、該2次元像に欠落角度情報回復処理を施して2次元断面像を得る工程からなる。

【0030】1次元投影データを収集する工程を示す。まず、1次元投影データ2と2次元断面像1の幾何学的な関係を図10に示す。試料12は厚さ $2d$ の平板試料とする。試料12内に注目領域301を設定し、その幅を $2a$ とする。試料12の最大傾斜角を $\pm \gamma$ 度とする。まず、図10(a)に示す様に d が a よりも充分小さい場合について考察する。試料傾斜角 γ における1次元投影データ2の両端データ201には、注目領域301以外の領域の投影データが混在している。そこで両端データ201を削除した1次元投影データ2のみを画像再構成に用いる。両端データ201の範囲を決定する方法を以下に幾つか示す。幾何学的な関係から削除する範囲はデータ両端から $a(1 - \cos \gamma) - 2d \cdot \sin \gamma$ である。試料12の厚さ $2d$ が既知でなくとも、注目領域301の周囲に特徴点が存在すれば、該特徴点の投影データ上での位置から決定できる。注目領域301の周囲に特徴点が存在しなければ、収束した電子線を注目領域の四角に照射して特徴点例えれば欠陥又はコンタミネーション跡を作製し、該特徴点の投影データ上での位置から決定する。尚、図10(b)に示す様に d と a がほぼ同じ長さの場合、試料傾斜角 γ における1次元投影データ2の全範囲に、注目領域301以外の領域の投影データが混在しており、該1次元投影データ2は再構成処理には使えない事が分かる。従って、注目領域301の幅 $2a$ は出来るだけ広めに設定する必要がある。

【0031】次に、前記1次元投影データを逆投影して2次元再構成像を構築する工程は通常のX線-CATで用いられている2次元フーリエ変換法、フィルタ補正逆投影法、重畠積分法などの方法で行う。

【0032】次に、前記2次元再構成像から2次元断面像の復元が不可能な領域を削除する工程を示す。1次元投影データ2を逆投影した段階の2次元再構成像では、図10(a)に示す注目領域301のうち、全試料傾斜角度の投影データから逆投影された領域は領域302だけである。該領域302以外の領域は像に含まれる投影データの情報量が極端に少なくなっている。電子顕微鏡では投影角度範囲が制限されているため、既知情報を用いて適当な欠落角度情報回復の処理を施す必要があるが、この処理を注目領域301にそのまま適応すると、領域302以外の領域の断面像を回復できないだけでな

く、領域302以外の領域が復元可能な領域302にアーティファクトを発生させる原因となる場合もある。そこで、領域302以外の領域を削除し、適当な試料構造例えば基板結晶に置き換え、アーティファクトが発生しない様にする必要がある。領域302以外の領域は、幾何学的には注目構造の端から各投影方向に直線を引いた場合、その外側にある領域として特定できる。

【0033】前記該処理を施した2次元像3に欠落角度情報回復処理を施して2次元断面像を得る工程を示す。欠落角度情報回復処理には2次元断面像に関する既知情報、例えば確率情報、対称性などの情報をもとに実行する。

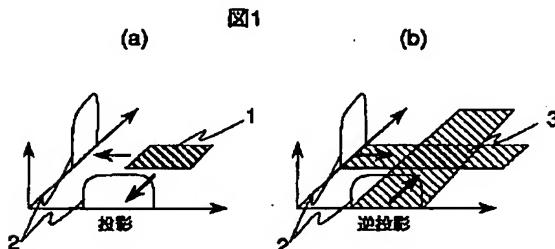
【0034】次に、前記2次元断面像1を積み重ねて構築した3次元像から3次元原子配列と原子種を解析する工程を示す。試料傾斜軸にそって各2次元断面像を順次再構成し、それらを積み重ねて3次元構造を構築する。2次元投影像3における像コントラストは電子線が通過した経路上に存在した原子数とその原子番号Zに依存したコントラストであるため、2次元投影像3のみから原子番号Zを特定することは困難であった。3次元再構成によって試料形状を解析することによって、試料を構成する原子の原子番号Zを特定できるようになる。

【0035】

【発明の効果】本発明によれば、様々な観察方向から観察した電子顕微鏡像から一般的な画像再構成の理論を用いて3次元的な原子配列像を高精度で構成できる。これによって、結晶中の不純物原子及びそれらのクラスタの3次元的な構造を原子1個のレベルで解析できる。従って、リーク電流や耐圧不良等のULSI素子の不良原因解析に有効な情報を提供する。

【0036】

【図1】



【図面の簡単な説明】

【図1】(a)は投影を、(b)は逆投影による画像再構成の原理を示す説明図。

【図2】本発明の実施例に用いた装置の全体構成図。

【図3】3次元原子配列像を構築する工程を示すフローチャート。

【図4】原子番号が異なる原子における、散乱電子線量の角度分布を示す説明図。

【図5】電子線を各試料位置に入射したときに散乱角度範囲 $\alpha \sim \beta$ に散乱される電子線量を示す説明図。

【図6】弾性散乱と熱散漫散乱の割合の散乱角度依存性を示す説明図。

【図7】座標系xyzと座標系 $\xi\eta\zeta$ 及びオイラー角 $\theta\psi\phi$ の関係を示す説明図。

【図8】座標軸解析に用いる各ベクトルを示す説明図。

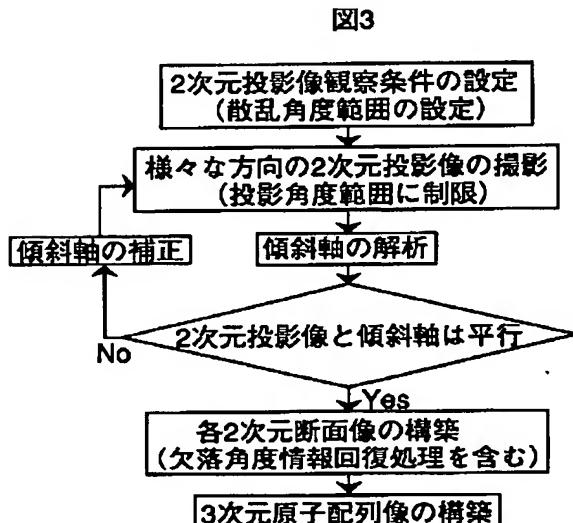
【図9】傾斜軸が2次元投影像と平行な時、2次元投影像から1次元投影データを収集できる事を示す説明図。

【図10】(a)は試料が薄い場合、(b)は試料が厚い場合の1次元投影データと2次元断面像の関係を示す説明図。

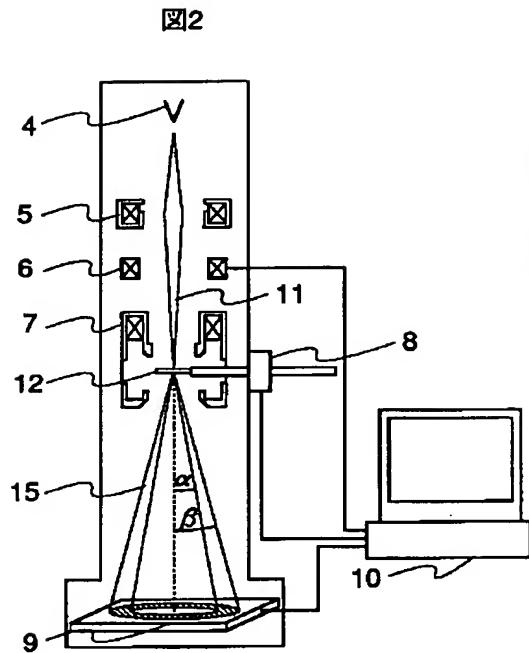
【符号の説明】

1…2次元断面像、2…1次元投影データ、201…2次元断面像再構成には不要な1次元投影データ、3…2次元再構成像、301…2次元断面像内の注目領域、302…2次元断面像が回復可能な領域、4…電界放出型電子銃、5…コンデンサーレンズ、6…ビーム偏向走査コイル、7…対物レンズ、8…試料微動・傾斜機構、9…電子線検出器、10…制御用及び画像処理用プロセッサ、11…入射電子線、12…試料、13…2次元投影像、14…試料傾斜軸、15…角度範囲 $\alpha \sim \beta$ に散乱された電子線。

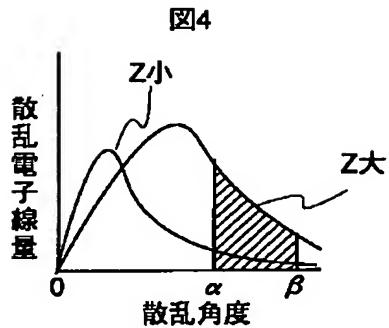
【図3】



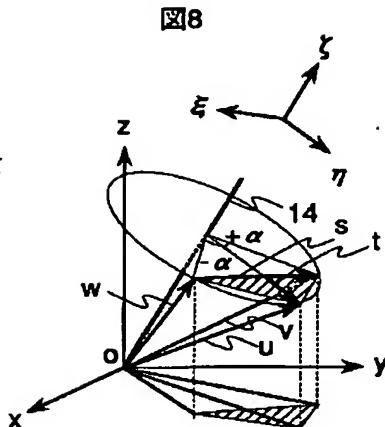
【図2】



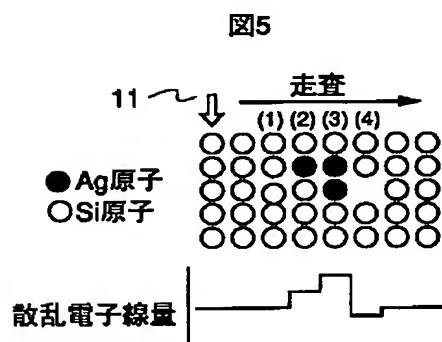
【図4】



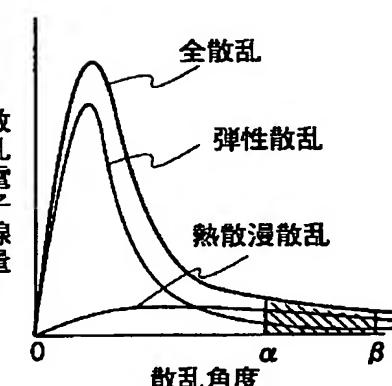
【図8】



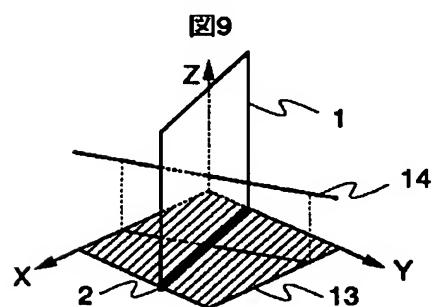
【図5】



【図6】

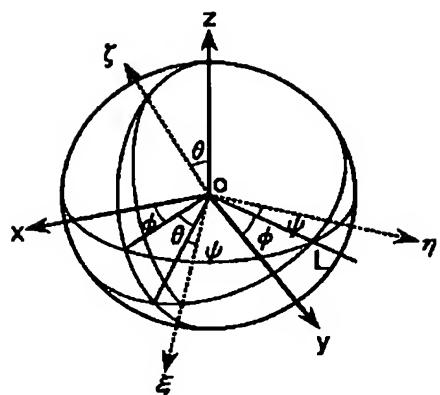


【図9】



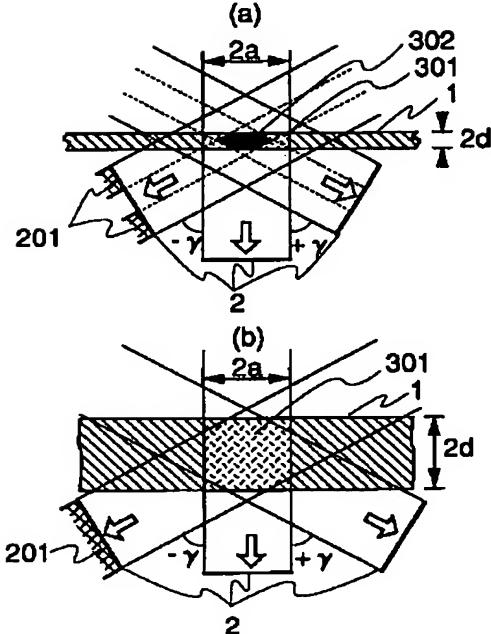
【図7】

図7



【図10】

図10



フロントページの続き

(72)発明者 関原 謙介

東京都国分寺市東恋ヶ窪1丁目280番地
株式会社日立製作所中央研究所内

(72)発明者 本池 順

東京都国分寺市東恋ヶ窪1丁目280番地
株式会社日立製作所中央研究所内